

编者按：在选煤生产实践中，煤泥水处理一直是众多选煤厂的生产瓶颈和问题环节。煤泥水直接外排不但严重污染环境，而且还会造成煤炭资源的浪费。煤泥水处理系统的正常运行关乎整个选煤系统的成败。多年来，太原理工大学董宪姝教授及其团队一直从事煤泥处理技术的理论与应用研究，并为全国多座选煤厂成功解决了煤泥水处理难题，在煤泥水处理方面积累了丰富的经验。本刊特邀董宪姝教授对当前国内外煤泥水处理技术进行了分析与评述，并对该技术的发展趋势进行了展望。

文章编号：1001-3571(2018)03-0001-08

## 煤泥水处理技术研究现状及发展趋势

董宪姝

(太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要：**阐述了黏土矿物、悬浮液中颗粒粒度特性、矿物泥化、煤变质程度和水质特征五因素对煤泥水处理的影响，介绍了当前煤泥水处理技术的研究热点，包括煤泥沉降脱水一体化技术、煤泥水沉降强化技术、煤泥脱水强化技术以及国外煤泥水处理的新思路，同时指出了煤泥水处理过程中存在的几个主要问题，并展望了煤泥水处理技术的发展趋势。

**关键词：**煤泥水处理；煤泥沉降脱水一体化技术；煤泥水沉降强化技术；煤泥脱水强化技术

中图分类号：TD946.2

文献标志码：A

## State-of-the-art and developing trend of coal slurry treatment technology

DONG Xianshu

(Mining Engineering College, Taiyuan University of Science & Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Following an elaboration on the effect on coal slurry treatment produced by five influential factors – presence of clay minerals, size characteristics of solid particles in suspension, degradation of minerals in water, and degree of metamorphism of coal and slurry water characteristics, an introduction is made to the hot points in the research of coal slurry treatment technologies currently made. These include, among others, the settling-dewatering combined technology, intensified sedimentation technology; intensified dewatering technology, and the new ideas in this respect abroad. It points out several major difficulties encountered in the process of coal slurry treatment and the developing trend of this technology.

**Key words:** coal slurry water treatment; settling-dewatering integrated technology; intensified settling technology; intensified dewatering technology

煤泥水是煤炭分选加工过程中产生的介质用水，是湿法选煤加工工艺的工业尾水。煤泥水中含有大量煤泥颗粒和泥砂，如不经处理外排会给矿区

周边环境造成严重污染。煤泥水是煤炭工业的主要污染源之一，越来越受人们的重视。随着用户对选煤产品要求越来越严格，选煤工艺趋于复杂，加之

收稿日期：2018-03-30 责任编辑：赵宏馨 DOI: 10.16447/j.cnki.cpt.2018.03.001

作者简介：董宪姝（1964—），女，辽宁葫芦岛人，教授，博士生导师，教育部教学指导委员会委员、《选煤技术》编委、中国煤炭学会选煤专业委员会副主任委员、选煤标准委员会副主任委员、山西省高等学校中青年拔尖创新人才、山西省学术技术带头人、山西省高等学校“131”领军人才，从事矿物加工的科研与教学工作，主要研究方向为矿物加工工艺、设备和理论，细粒难处理煤泥的沉降脱水、煤炭固废及伴生矿物利用和煤炭脱硫等。E-mail: dxshu520@163.com, Tel: 13099093565。

引用格式：董宪姝. 煤泥水处理技术研究现状及发展趋势 [J]. 选煤技术, 2018 (3): 1-8.

DONG Xianshu. State-of-the-art and developing trend of coal slurry treatment technology [J]. Coal Preparation Technology, 2018 (3): 1-8.

选煤厂向大型化发展,水资源愈加珍贵,环境保护标准越来越严格,煤泥水处理作业已经成为整个选煤工艺中涉及面最广、投资最大、最复杂、最难管理的工艺环节。特别是一些性质特别稳定的煤泥水体系,不但悬浮物浓度和 COD 浓度高,而且颗粒表面还带有较强的负电荷,往往静置几个月也不会自然沉降,给后续煤泥脱水环节和洗水厂内循环再利用带来很大的挑战<sup>[1-2]</sup>。

文章结合目前国内外煤泥水处理技术的研究现状,围绕影响煤泥水处理的主要因素展开论述,分析了当前煤泥水沉降脱水过程中的热点问题,介绍了当前煤泥水处理技术、药剂、工艺等方面的研究现状,总结了存在的主要问题,并对煤泥水处理技术的发展趋势进行了展望。

## 1 影响煤泥水处理的主要因素

### 1.1 黏土矿物对煤泥水处理的影响

国内外众多研究表明:黏土矿物是导致煤泥水处理困难的主要因素。煤泥水中比较常见的黏土矿物有高岭石、蒙脱石、方解石、伊利石等,这些黏土类矿物往往占矿物总质量的 60% 以上。一方面,这些黏土类矿物具有特殊的晶体结构,极易泥化和冲击裂解,进而形成大量的微米级和亚微米级的细泥,长期稳定悬浮在煤泥水体系当中,难以处理;另一方面,这些矿物颗粒在水中会发生水化和选择性吸附、溶解及晶格取代作用等,使颗粒表面荷负电,并形成双电层和水化膜,进而产生静电斥力和空间位阻效应,使煤泥水更加难以沉降脱水。

亓欣、匡亚莉<sup>[3-4]</sup>针对不同类型的黏土矿物对煤泥水颗粒表面性质和沉降脱水的影响进行了大量的试验研究,结果发现:高岭石和伊利石在煤泥水中分散性差,存在较多大颗粒,有利于煤泥水沉降;而蒙脱石软化崩解后粒度较细,更易均匀分散,不利于煤泥水沉降。高岭石和伊利石对煤表面的电负性影响较小,而蒙脱石增加了混合煤样的电负性,使煤泥颗粒更易稳定悬浮,不利于煤泥水沉降。蒙脱石的存在可引起沉降恶化和过滤时间增长的负面影响,高岭石的存在对煤泥水处理影响较小,在一定浓度下伊利石的存在对煤泥水处理的影响几乎可以忽略。

刘炯天等<sup>[5]</sup>根据扩展的 DLVO 理论,计算了颗粒间的相互作用势能,并分析了颗粒分散行为,在沉降试验的基础上讨论了颗粒之间的沉降模式,指出:在煤与高岭石共存的煤泥水中,首先发生的

是煤颗粒之间的凝聚,其次是煤与高岭石颗粒之间的凝聚,凝聚而成的大颗粒容易沉降,剩余的高岭石颗粒分散悬浮于水中,而蒙脱石颗粒形成网架结构,煤颗粒被“包裹”在其中,呈整体沉降。张明青的研究结果表明:由于蒙脱石特殊的膨胀性,蒙脱石比高岭石更易使煤泥水的悬浮稳定性提高,从而使煤泥的脱水难度增加。Arnold 和 Aplan 也通过试验证明高岭石和伊利石对煤泥分选精度影响不大,而蒙脱石影响较大。

### 1.2 悬浮液中颗粒粒度特性对煤泥水处理的影响

颗粒在分散介质中一方面受到重力作用而下降,另一方面由于布朗运动又促使浓度趋于均一。颗粒粒度越小,布朗运动越激烈,当颗粒粒径超过十几微米时,布朗运动消失。在自由沉降条件下,颗粒的沉降速度与粒径之间的关系符合 Stokes 定律,沉降速度  $v = [(\delta - \rho)gd^2]/18\mu$  (式中:  $\delta$  为颗粒密度;  $\rho$  为水的密度;  $\mu$  为流体黏度;  $d$  为颗粒直径;  $g$  为重力加速度)。在其他条件相同时,颗粒沉降速度  $v$  与  $d^2$  成正比,即随着颗粒粒径减小,沉降速度显著降低。

冯莉等<sup>[6]</sup>测定了密度在  $1.35 \times 10^3 \sim 1.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  之间的煤泥的自由沉降速度,结果表明:粒径  $> 0.07 \text{ mm}$  的颗粒沉降速度较大,可自然沉降;粒径  $< 0.01 \text{ mm}$  的颗粒则因为剧烈的布朗运动与自由沉降速度相抗衡,最终粒子处于均匀分散状态,无法实现自由沉降;粒径在  $0.01 \sim 0.07 \text{ mm}$  之间的粒子沉降速度较小,需在凝聚或絮凝状态下沉降。樊玉萍<sup>[7]</sup>运用 PIV 技术对比了各个粒级的实际沉降速度,通过 Stokes 公式计算得到各粒级颗粒在滞流区的临界沉降速度,结果发现:粒径  $> 0.045 \text{ mm}$  的颗粒实际沉降速度均高于计算速度,因此并非处于滞流区,颗粒可自然沉降;并进一步根据粒径  $< 0.045 \text{ mm}$  颗粒的最小沉降速度  $0.00128 \text{ m/s}$ ,计算得到了沉降失稳的临界粒度 ( $0.026 \text{ mm}$ )。

对于煤泥脱水而言,粒度特性(包括粒度、粒度组成、均匀度)是物料的重要物理性质,它首先决定了物料的比表面积,其次对其形成的滤饼孔隙率和毛细管直径都有显著的影响。一般来说,物料粒度越小,物料的比表面积越大,单位质量颗粒所具有的总比表面积越大,吸附的水量越多,脱水后表面吸附水分也越高;物料粒度越小,物料料层的孔隙越小,毛细管直径越小,毛细水的脱除阻力增大,脱水越发困难。Fan 等<sup>[8]</sup>指出: $< 0.045 \text{ mm}$  粒级物料是制约煤浆脱水效果的关键,

随着颗粒直径的减小,煤浆的过滤速度和滤饼孔隙率逐渐下降,滤饼水分和过滤比阻逐渐升高,且含有 $<0.045\text{ mm}$ 粒级的样品中粒度均匀度较高的物料脱水效果较好。陈茹霞等<sup>[9]</sup>得出:物料粒度越细,滤饼分形维数越大,孔隙率越小,特别是当粒度为 $<0.045\text{ mm}$ 时,滤饼孔隙率只有5%左右。陈少辉<sup>[10]</sup>通过对级配类型的选择与优化,进行了不同粒度级配条件下的正压过滤试验,探究了粒度组成对浮选精煤脱水的影响机制,分析了滤饼内部液体的流动状态及正压过滤过程,也得出了类似的规律。此外,徐岩、彭昌盛、李静等也得出了相同的结论<sup>[11-13]</sup>。

### 1.3 矿物泥化对煤泥水处理的影响

各国选煤工作者对不同的矿物泥化性能进行了大量的研究分析,结果发现:不同变质程度的煤泥化率极低;夹在煤层中的矽石泥化率也较低;对于含有黏土岩的砂岩和页岩,由于其质地坚硬,不会因水的浸泡和一定程度的机械破碎作用而分散成极细的颗粒,因此也不易泥化;然而,蒙脱石含量较高的绿泥岩属于软质土类,在水中易严重泥化,常以极细的颗粒存在,是导致煤泥水难沉降的直接原因<sup>[14]</sup>。刘令云等<sup>[15]</sup>对淮南矿区不同密度级的原煤进行了泥化研究,并分别采用激光粒度仪和X射线衍射仪对不同密度级原煤泥化产物的粒度组成、矿物组成进行了分析,结果表明:泥化煤泥中含有大量 $<0.045\text{ mm}$ 粒级的细颗粒,随原煤密度增加,泥化煤泥中石英含量逐渐增大,中间密度级原煤泥化煤泥中高岭土含量最高,泥化煤泥中主要矿物为石英和高岭土,二者严重影响煤泥水的澄清处理。

### 1.4 煤变质程度对煤泥水处理的影响

刘云霞<sup>[16]</sup>研究了不同变质程度煤样在阳离子絮凝剂作用下的煤泥宏观沉降性能与微观絮团结构变化情况,得出絮团分形维数值从高到低为:屯兰焦煤、寺河无烟煤、长治贫煤、神东长焰煤、王家岭气煤,沉降效果随变质程度的提高逐渐变好。张明青等<sup>[17-18]</sup>利用扩展的DLVO理论计算了长焰煤、气煤和贫瘦煤三种不同变质程度煤的颗粒在水中的相互作用能,分析了变质程度对煤泥水沉降性能的影响,发现贫瘦煤颗粒之间最易凝聚,气煤次之,长焰煤最不易凝聚,从而得出煤泥水所含煤颗粒变质程度越高越易澄清的结论。

孙冬和陈茹霞<sup>[19-20]</sup>的研究结果表明:煤的变质程度对煤泥的脱水效果影响显著,中等变质程度的煤样脱水效果最好,变质程度过高或过低都不利

于脱水的进行。崔平<sup>[21]</sup>则得出随着煤变质程度的降低,滤饼水分和过滤操作时间均增加的结论。

### 1.5 水质特征对煤泥水处理的影响

煤泥水体系是多相多种分散态共存的混合分散体系,通常难以实现自然沉降,而加入一些高价金属阳离子( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 等)可以压缩固体颗粒表面的双电层,并减少表面的负电性,使体系当中的固体颗粒达到凝聚结合的目的。从煤泥水水质的角度分析,煤泥水体系中高价金属阳离子的含量是影响煤泥水沉降性能的重要因素,原因是煤泥水体系的硬度主要取决于多价金属离子的含量,而这些金属离子的含量又与水质的pH值密切相关。在实际生产当中,人们逐渐意识到提高水质硬度可以实现煤泥水澄清<sup>[22]</sup>。

张明青<sup>[23]</sup>利用扩展的DLVO理论,计算了两种硬度条件下煤和高岭石组成的煤泥水中颗粒之间的相互作用,并进行了沉降试验,得出:当水质硬度为 $1\text{ mmol/L}$ 时,煤颗粒之间、高岭石颗粒之间以及煤与高岭石颗粒之间都不凝聚而处于悬浮态;当水质硬度为 $10\text{ mmol/L}$ 时,煤颗粒之间最易凝聚,其次是煤颗粒和高岭石颗粒,剩余的高岭石颗粒始终不凝聚而分散悬浮于水中。张志军等<sup>[24-25]</sup>通过煤泥水沉降试验,并结合实际生产状况,得出煤泥水原生硬度低,则煤泥水难处理,煤泥水原生硬度高,则煤泥水易处理的结论。这说明原生硬度是影响煤泥水沉降性能的关键因素。

马正先<sup>[26]</sup>等考察了pH值对煤泥水絮凝沉降的影响。试验结果表明:在不同的pH值条件下,煤泥水的絮凝效果不同;在酸性条件下,宜单独使用有机高分子絮凝剂;在中性至碱性条件下,无机凝聚剂和有机絮凝剂联合使用效果较好。

刘云霞<sup>[27]</sup>得出:在酸性条件下,添加非离子絮凝剂与阳离子絮凝剂的煤泥水沉降效果均显著提高;在中性条件下,添加阴离子型絮凝剂,五个煤样的沉降效果均最佳。杨晶晶等<sup>[28]</sup>得出:在煤浆浓度为 $300\text{ g/L}$ 、抽滤时间为 $3\text{ min}$ 、煤浆pH值为 $7.99$ 左右时,过滤后滤饼水分较低,滤液的浊度较小,过滤速度也较快。陈茹霞<sup>[19]</sup>得出:随着pH值的减小,滤饼上表面的孔隙率增大,分形维数有所减小,滤饼比阻降低,更有利于脱水。

## 2 煤泥水处理技术研究热点

### 2.1 煤泥沉降脱水一体化技术

近年来,随着采煤机械化程度和煤炭选前破碎

解离程度的提高,选煤厂原生煤泥和次生煤泥量都显著增加,加之世界各国对环保要求的日益严格,给选煤厂煤泥水处理带来了更大的挑战。各国选煤工作者都在致力于煤泥水处理技术与设备的研究,强化细粒煤产品的沉降脱水,以实现煤泥水厂内闭路循环,适应竞争日益激烈的煤炭市场。鉴于以上情况,董宪姝教授研究团队的科研人员<sup>[29-31]</sup>在多年煤泥水理论与技术研究的基础上,创造性地提出了基于絮团-滤饼微观结构的煤泥沉降脱水一体化理论。基于该理论,借助PIV系统以及图像处理技术<sup>[32]</sup>,分析了煤泥的粒度组成、煤样变质程度、矿物质成分及含量、水质特性、氧化程度和药剂制度对煤泥沉降脱水效果的影响<sup>[33]</sup>,并探索了微观层面上的絮团和滤饼结构对煤泥沉降脱水的影响规律。该研究阐明了这一焦点问题的内在耦合规律,具有重大的现实意义,并且研究成果已多次成功应用于工业现场。

## 2.2 煤泥水沉降强化技术

在选煤厂实际生产中,通常采用添加凝聚剂和絮凝剂的方法来强化细颗粒煤泥水的沉降,以此来实现清水洗煤,确保洗水闭路循环。虽然目前国内外可用于煤泥水处理的新型药剂已研发较多,但是由于成本、药剂特性等因素的限制,在选煤厂大量推广使用的并不多,大多数选煤厂仍以传统的絮凝剂与凝聚剂为主<sup>[34-36]</sup>。

絮凝剂的絮凝机理,目前公认的是吸附架桥机理,即通过吸附架桥、吸附电性中和及网捕沉淀作用,使颗粒间形成絮团,使悬浮液失稳,从而强化煤泥水澄清脱水。按照来源不同,絮凝剂可分为天然高分子絮凝剂和人工合成高分子絮凝剂。天然高分子絮凝剂主要有:①淀粉加工产品及其衍生物。这类絮凝剂具有易生物降解,且降解产物具有对人体无害、选择性高、成本低等优点。虽然淀粉改性絮凝剂的研究报道并不少见,也有部分成熟的产品问世,但是由于此类絮凝剂主要来源于粮食作物,因此目前未能广泛应用于生产;②纤维素的衍生物、通过化学改性后的壳聚糖衍生物作为絮凝剂也具有较好的絮凝效果。纤维素是构成植物细胞壁的基础物质之一,而壳聚糖是通过将甲壳质分子中的乙酰基脱去而制得的,两种物质具有来源广泛、无毒害、可生物降解等特性,应用前景广阔。在我国选煤厂,人工合成的高分子类絮凝剂应用最多的是聚丙烯酰胺类物质。聚丙烯酰胺又可分为阳离子型、阴离子型、非离子型以及双离子型,其中:阴

离子型聚丙烯酰胺是聚丙烯酰胺用碱处理后经水解改性反应得到的部分水解产品;阳离子型聚丙烯酰胺是聚丙烯酰胺甲基改性反应的产物;双离子型聚丙烯酰胺是大分子链上同时带有阴、阳离子基团的高分子,同时具备阳离子型和阴离子型絮凝剂的综合性能;非离子型聚丙烯酰胺是指未经水解或水解度低于4%的聚丙烯酰胺产品。在煤泥水处理中应用较多的絮凝剂是阴离子聚丙烯酰胺和双离子型聚丙烯酰胺,其他两种则由于分子量低、合成工艺复杂、成本高、适用范围受限等原因很少在现场使用。

由于煤泥颗粒荷负电,因此煤泥水处理常用的凝聚剂多为阳离子型。凝聚剂主要有无机电解质和无机高分子凝聚剂。应用较多的无机电解质是铁盐和铝盐,这类电解质在水中可以电解产生离子,能调整固体颗粒表面电荷、压缩双层,从而使其凝结成块,这就是所谓的凝聚过程。应用较多的无机高分子凝聚剂有聚合氯化铝、聚合氯化铁、聚合硫酸铝、聚合硫酸铁等,这类凝聚剂凝聚效果一般要优于传统的铁盐和铝盐凝聚剂,这是因为这些聚合物中含有大量带正电荷的聚羟阳离子,聚羟阳离子能参与电中和与压缩双电层作用,能够有效地使煤泥颗粒物沉降<sup>[37-39]</sup>。

然而,采用添加药剂的手段来加速煤泥水沉降存在药剂消耗过大、成本过高和难以降解的问题,因此从上世纪40年代至今,很多科研工作者采用电化学絮凝法(也称电絮凝法),利用铝或铁等可溶性电极在电流作用下溶解生成铝或铁的氢氧化物的絮凝性来凝聚水中的胶体物质,从而使工业废水得以净化。

在煤泥水处理领域,前苏联的Bapckuu等研制了由直流电源和圆柱形电极组成的电凝聚装置,并将其成功运用于选煤生产中。生产实践证明:在功率为5 kW、电流为200 A的条件下,煤泥水经电絮凝处理后,浓缩机工作稳定,而且使聚丙烯酰胺用量降低了60%。国内许多学者也长期致力于电化学装置和理论的研发。董宪姝教授研究团队<sup>[40-42]</sup>在对煤泥水性质进行大量研究的基础上,系统地将电化学技术应用到难沉降煤泥水处理当中。研究结果<sup>[43-44]</sup>表明:电化学预处理技术能够改变煤泥水体系中颗粒表面的电荷量,从而达到压缩双电层,减小甚至消除相同颗粒间的相互排斥作用而使之凝聚。采用电解质对煤泥水进行电化学预处理后,煤泥水沉降效果可得到明显改善。

### 2.3 煤泥脱水强化技术

国内外机械脱水技术的研究已非常深入,有真空过滤脱水、加压过滤脱水、离心脱水、压滤脱水、沉降过滤离心脱水等方法。目前,在加强传统技术研发的基础上,又有了新的突破,比如采用高频电磁激振器和低频近直线振动激振筛箱,增强设备的自清洗能力与物料输送能力。石常省等在细粒煤脱水研究中引入十字流过滤技术,可使脱水产品水分比精煤压滤机低8~10个百分点。张英杰、巩冠群等提出了细粒煤筒式压滤脱水工艺以及压密理论模型,结果表明:筒式压滤脱水工艺比传统工艺具备许多优势,如抗压能力强,便于连续作业等<sup>[45-47]</sup>。

进行细粒煤过滤脱水时,添加化学助滤剂通常能强化脱水效果,提高过滤效率,有效降低产品水分。常用的化学助滤剂主要有高分子絮凝剂和表面活性剂两种。煤泥滤饼当中的水分有四种赋存状态,即自由水、毛细水、结合水、化合水。一般机械脱水只能脱除自由水和部分毛细水,结合水和化合水无法通过机械方法脱除。根据拉普拉斯方程可知,毛细压力与毛细管半径、气液界面张力和固液接触角有关。高分子絮凝剂的作用主要就是使细粒煤泥絮凝成为絮团,使得毛细管半径增大,毛细压力降低,同时有效避免微细颗粒物堵塞过滤介质,提高物料的渗透性能。对于高分子絮凝剂,目前国内外的研究和应用都已经很成熟,但表面活性剂的助滤机理至今仍无定论,研究普遍集中在表面活性剂降低滤液的表面张力和增加煤-水界面的接触角两个方面<sup>[48-50]</sup>。

此外,还有许多学者针对煤的不同特性,借助各种力场的复合作用来实现和强化细粒精煤脱水。董宪姝教授研究团队的电化学脱水试验结果<sup>[28-51]</sup>表明,脱水的最佳工艺条件为:电解电压30V,入料浓度25g/L,电解时间30min。在此条件下,滤饼水分可以降低1.60个百分点,过滤速度可以提高 $1.50 \times 10^{-2} \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。将铝盐作为电解质时,滤饼水分最大可以降低4个百分点。朱立谷、单忠健<sup>[52]</sup>采用电渗脱水工艺与真空过滤工艺相结合的方法对沉降过滤式离心机产生的离心液进行处理,分析了电化学条件对浮选精煤电渗脱水效率的影响,结果表明联合工艺脱水效率明显优于其他工艺。李里特等<sup>[53]</sup>采用交变电场、渗透脱水与机械脱水相结合的技术,通过提高电渗透速率与流量,降低了物料的最终水分。

还有许多学者<sup>[54-55]</sup>认为,物料中各粒级颗粒的配合对过滤性能具有重要的影响,可以通过向细粒级物料中掺入粗料的方法来改变固相颗粒的粒度组成、悬浮液粘度以及固-液、固-固表面的相互作用,从而改变滤饼孔隙结构,增加其渗透能力,最终达到强化脱水的目的。

### 2.4 国外煤泥水处理的新思路

美国肯塔基大学研究者 Parekh<sup>[56]</sup>在实验室开发了一种两阶段脱水新工艺,利用了真空和加压脱水两种技术。据观察,在真空条件下形成的细粒滤饼往往具备多孔结构,水分被困在毛细管中。当这种多孔滤饼在短时间内受到压力时,自由水和部分毛细水会从滤饼中释放出来。实验室研究表明:根据煤种,采用两级过滤技术可得到含水量约为15%的滤饼。犹他大学 Lin 等<sup>[57-59]</sup>采用高分辨率X射线显微断层扫描技术分析滤饼的数字空间孔隙结构特征与流体流动及运输特性,为研究细粒煤脱水提供了新思路。

澳大利亚 Ofori 等<sup>[60-61]</sup>采用絮凝-过滤法对煤泥水进行处理,并提出了一些尾矿脱水的新概念,详细研究了不同类型絮凝剂及投加量对预处理尾矿过滤动力学与滤饼含水率的影响,建立了滤饼渗透率与絮团结构的关系模型,结果发现:絮体尺寸越大,滤饼的渗透率越大;阴离子絮凝剂能够产生大絮体,阳离子絮凝剂产生的絮体小而弱;在煤泥水固体含量为35%、过滤压力为40kPa、阴离子絮凝剂添加量在350g/t左右的条件下,能够对煤泥水进行高效地过滤。

加拿大的阿尔伯特大学 Yi 和 Alagha 等<sup>[62-64]</sup>利用石英晶体微天平对人工合成的有机-无机复合絮凝剂与高岭石、尾矿颗粒表面的相互作用机理及其沉降性能进行了大量研究,分析了聚合物特性与溶液性质对尾矿处理的影响,结果表明:溶液盐度的增加显著降低了带负电的固体颗粒和带负电的高分子絮凝剂之间的静电斥力,从而使聚合物有效发挥了架桥作用,提高了矿物尾矿的沉降性能,为了解溶液盐度对矿物尾矿沉降的影响和新型高分子絮凝剂的开发提供了新思路。

南非学者 Roux<sup>[65-66]</sup>提出了一种改进的细粒煤真空过滤方法。在小型真空过滤机上进行的试验表明:在脱水循环过程中,采取中断操作时,滤饼最终水分会降低,脱水速率也有所增加。进一步的研究表明:如果对滤饼进行人为损坏(促使空气流量增加),能够得到最终水分较低的产品,由此得

出,增加滤饼空气流量比增加过滤真空度更有利于细粒煤脱水。

### 3 煤泥水处理存在的问题

(1) 对于高泥化难处理煤泥水,由于体系中表面荷负电的微细煤泥颗粒含量较高,颗粒间斥力较大,水化膜较强,难以有效沉降脱水,因此添加常规的高分子絮凝剂和助滤剂不但难以达到理想的效果,而且药剂昂贵,会降低选煤厂的经济效益。

(2) 微生物絮凝和电化学处理煤泥水技术都处在实验室研究阶段,微生物絮凝技术面临菌种分离提纯、微生物分泌物分离等问题。电化学处理技术则存在电极消耗大和易钝化等问题。

(3) 煤泥水絮凝和过滤的理论推导研究进度较慢且不完善,煤泥水沉降和脱水之间、宏观与微观体系之间内在的耦合规律探索仍然不够。

(4) 药剂与煤泥水固体之间相互作用机理以及絮团和滤饼微观结构的研究仍然处于定性研究阶段,目前尚难以起到指导实际生产的作用。

### 4 煤泥水处理技术发展趋势

(1) 加强对煤泥水中矿物,特别是黏土矿物颗粒表面性质的认识,研发新型低成本的、高效的、环境友好型絮凝剂、助滤剂与调整剂,使黏土类矿物表面疏水化,形成较弱的水化膜,促使黏土矿物颗粒相互团聚,以此来破坏水分子的有序性,降低薄水化膜的厚度,是煤泥水处理技术发展的必然趋势。

(2) 加大沉降脱水设备和基础理论的研究力度,开辟新思路,在材料、设备、设计技巧、附设复合力场与自动控制环节实现突破和加强,是煤泥水技术发展的根本。

(3) 微生物絮凝剂处理技术和电化学法处理技术是未来高效处理煤泥水的必经之路,应当进一步减少电极消耗和钝化,以降低电耗,并需进一步对加电方式、电极材料、极化方式等各种影响因素以及电絮凝过程中各种物理、化学过程的机理进行更深入地研究。

(4) 利用先进的计算机建模技术和数学统计方法,更好地揭示宏观层面上的沉降脱水内在相互作用关系;采用更多的现代表征测试技术(比如CT扫描、Cryo-SEM、AFM、QCM-D)与高端模拟技术(如分子模拟和流体动力学模拟),加强对微观作用机理的认识,是未来指导现场实际生产的基础。

参考文献:

- [1] 谢广元. 选矿学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2016.
- [2] WANG C, HARBOTTLE D, LIU Q, et al. Current state of fine mineral tailings treatment: A critical review on theory and practice [J]. Minerals Engineering, 2014, 58 (4): 113-131.
- [3] 元欣, 匡亚莉. 黏土矿物对煤泥表面性质的影响 [J]. 煤炭科学技术, 2013, 41 (7): 126-128.
- [4] 元欣, 匡亚莉. 黏土矿物对煤泥水处理的影响 [J]. 煤炭工程, 2013, 1 (2): 102-105.
- [5] 刘炯天, 张明青, 曾艳. 不同类型黏土对煤泥水中颗粒分散行为的影响 [J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39 (1): 59-63.
- [6] 冯莉, 刘炯天, 张明青, 等. 煤泥水沉降特性的影响因素分析 [J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39 (5): 671-675.
- [7] 樊玉萍. 平朔弱粘煤沉降脱水特性研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- [8] FAN Y P, DONG X S, LI H. Dewatering effect of fine coal slurry and filter cake structure based on particle characteristics [J]. Vacuum, 2015, 114: 54-57.
- [9] 陈茹霞, 樊玉萍, 冯泽宇, 等. 浓度和粒度对细粒煤滤饼结构影响的研究 [J]. 中国矿业, 2017, 26 (2): 133-138.
- [10] 陈少辉. 浮选精煤正压级配脱水机制研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [11] 徐岩, 马仲涛. 浮选精煤粒度组成对脱水效果影响的实践探索 [J]. 中国矿业, 2009, 18 (Z1): 105-107.
- [12] 彭昌盛, 王趁义. 药剂制度和操作条件对浮选精煤助滤脱水效果的影响 [J]. 煤炭科学技术, 1998, 26 (9): 29-32.
- [13] 李静, 董宪姝, 姚素玲, 等. 粒度对细粒煤脱水效果影响的试验研究 [C] // 中国煤炭学会选煤专业委员会. 2010年全国选煤学术交流会议论文集. 唐山: 《选煤技术》编辑部, 2010: 34-36.
- [14] 贺建明. 矽石泥化性质对煤泥水沉降性能的影响 [J]. 洁净煤技术, 2012, 18 (5): 6-9.
- [15] 刘令云, 闵凡飞, 张明旭, 等. 不同密度级原煤的泥化特性 [J]. 煤炭学报, 2012, 37 (Z1): 182-186.
- [16] 刘云霞. 煤泥絮团结构特性研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [17] 张明青, 刘炯天, 王永田. 煤变质程度对煤泥水沉降性能的影响 [J]. 煤炭科学技术, 2008, 36 (11): 102-104.
- [18] 张华, 曾艳, 张明青. 煤泥水絮凝沉降性能影

- 响因素试验研究 [J]. 能源环境保护, 2009, 23 (4): 28-31.
- [19] 陈茹霞. 煤泥滤饼结构特性的研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [20] 孙冬. 复合型煤泥脱水助滤剂研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2008.
- [21] 崔平, 杨敏, 张代林. 影响细粉煤滤饼含湿量的主要因素研究 [J]. 煤炭科学技术, 2005, 33 (2): 50-52.
- [22] 毕梅芳, 王怀法, 余萍. 煤泥水溶液化学环境对絮凝效果影响的研究 [J]. 洁净煤技术, 2009, 15 (3): 24-26.
- [23] 张明青, 刘炯天, 王永田. 水质硬度对煤泥水中煤和高岭石颗粒分散行为的影响 [J]. 煤炭学报, 2008, 33 (9): 1058-1062.
- [24] 张志军, 刘炯天, 冯莉, 等. 基于 DLVO 理论的煤泥水体系的临界硬度计算 [J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43 (1): 120-125.
- [25] 张志军, 刘炯天. 基于原生硬度的煤泥水沉降性能分析 [J]. 煤炭学报, 2014, 39 (4): 757-763.
- [26] 马正先, 佟明煜, 朴正武. pH 对煤泥水絮凝沉降的影响 [J]. 环境工程学报, 2010, 4 (3): 487-491.
- [27] 刘云霞, 董宪姝, 樊玉萍, 等. 粒径对煤泥絮团特性及沉降效果的影响 [J]. 中国粉体技术, 2017 (5): 59-63.
- [28] 杨晶晶, 董宪姝, 姚素玲, 等. 超细粒煤过滤脱水最佳工艺条件的研究 [J]. 选煤技术, 2009 (4): 34-36.
- [29] 侯金瑛, 董宪姝. 分散介质流变性对煤泥脱水性能的影响研究 [J]. 中国煤炭, 2016, 42 (3): 82-86.
- [30] 侯金瑛. 煤泥悬浮液流变性及其对沉降脱水效果影响的研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [31] 樊玉萍, 董宪姝. 粒度组成特性对煤泥脱水效果影响的研究 [J]. 中国煤炭, 2015 (3): 95-100.
- [32] 冯泽宇. 基于 PIV 技术的煤泥沉降特性研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [33] 马瑾, 樊玉萍, 董宪姝, 等. 改性膨润土对煤泥脱水效果的影响 [J]. 中国粉体技术, 2017 (1): 42-47.
- [34] 刘晓梅, 刘炯天, 吕鑫磊. 煤泥水处理药剂综述 [J]. 洁净煤技术, 2009, 5 (5): 20-24.
- [35] 张明青, 曾艳, 刘炯天. 选煤厂煤泥水澄清处理技术研究进展 [J]. 能源环境保护, 2010, 24 (1): 16-19.
- [36] 张明旭. 选煤厂煤泥水处理 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005.
- [37] 王雷, 李宏亮, 彭陈亮, 等. 我国煤泥水沉降澄清处理技术现状及发展趋势 [J]. 选煤技术, 2013 (2): 82-86.
- [38] 张东晨, 张明旭, 陈清如. 煤泥水处理中絮凝剂的应用现状及发展展望 [J]. 选煤技术, 2004 (2): 1-3.
- [39] 陈军, 闵凡飞, 刘令云, 等. 高泥化煤泥水的疏水聚团沉降试验研究 [J]. 煤炭学报, 2014, 39 (12): 2507-2512.
- [40] 杨瑞, 樊玉萍, 董宪姝. 超声电化学法处理难沉降煤泥水的试验研究 [J]. 煤炭技术, 2014, 33 (11): 274-277.
- [41] FAN Y P, DONG X S. Synergistic effects of ultrasound and electrolysis on the dehydration of fine lignite coal [J]. Energy Technology, 2015, 3 (11): 1084-1092.
- [42] 董宪姝, 姚素玲, 刘爱荣, 等. 电化学处理煤泥水沉降特性的研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39 (5): 753-757.
- [43] 董宪姝, 姚素玲, 张凌云. 电化学絮凝的应用与发展 [J]. 选煤技术, 2008 (4): 132-135.
- [44] 董宪姝, 孙玲, 孙冬, 等. 电解处理难沉降煤泥水最佳工艺条件的研究 [J]. 选煤技术, 2010 (5): 5-8.
- [45] PAREKH B K. Dewatering of fine coal and refuse slurries - problems and possibilities [J]. Procedia Earth & Planetary Science, 2009, 1 (1): 621-626.
- [46] 杨俊利, 邢玉梅. 我国细粒煤脱水技术与设备研究现状 [J]. 过滤与分离, 1999 (2): 37-40.
- [47] 邓金迪, 沈丽娟, 杨泽坤, 等. 细粒煤脱水技术与设备现状及发展方向 [J]. 矿山机械, 2006 (4): 77-80.
- [48] 任伟鹏, 董宪姝, 魏文珑, 等. 选煤工业中常见助滤剂种类及其应用 [J]. 中国煤炭, 2009, 35 (4): 94-97.
- [49] 李满, 徐海宏. 药剂对细粒煤脱水的作用分析 [J]. 选煤技术, 2003 (3): 14-15.
- [50] QI Y, THAPA K B, HOADLEY A F A. Application of filtration aids for improving sludge dewatering properties - A review [J]. Cheminform, 2011, 42 (41): 373-384.
- [51] DONG X S, HU X J, YAO S L, et al. Vacuum filter and direct current electro-osmosis dewatering of fine coal slurry [J]. Procedia Earth & Planetary Science, 2009, 1 (1): 685-693.
- [52] 朱立谷, 单忠健. 超细粒煤浆电渗脱水的试验研究 [J]. 中国煤炭, 1996 (2): 24-25.
- [53] 李里特, 李修渠. 提高电渗脱水速率的措施 [J].

- 食品科学,1999 (3): 18-21.
- [54] 李腾,陈建中,沈丽娟,等. 浮选精煤掺粗对其脱水效果的影响 [J]. 矿山机械,2012,40 (3): 85-88.
- [55] 杨虬,孙远,郝朋,等. 通过改善粒度组成提高浮选精煤脱水效果试验研究 [J]. 煤炭工程,2013,45 (12): 106-108.
- [56] PATIL D P, PAREKH B K. Determination of Free and Bound Water in Fine Coal Filter Cake [J]. Coal Preparation, 2004, 24 (5-6): 217-232.
- [57] LIN C L, MILLER J D. Network analysis of filter cake pore structure by high resolution X-ray microtomography [J]. Chemical Engineering Journal, 2000, 77 (1-2): 79-86.
- [58] LIN C L, MILLER J D. Pore structure and network analysis of filter cake [J]. Chemical Engineering Journal, 2000, 80 (1-3): 221-231.
- [59] LIN C L, MILLER J D. Pore structure analysis of particle beds for fluid transport simulation during filtration [J]. International Journal of Mineral Processing, 2004, 73 (2-4): 281-294.
- [60] OFORI P, NGUYEN A V, FIRTH B, et al. The role of surface interaction forces and mixing in enhanced dewatering of coal preparation tailings [J]. Fuel, 2012, 97 (7): 262-268.
- [61] ALAM N, OZDEMIR O, HAMPTON M A, et al. Dewatering of coal plant tailings: Flocculation followed by filtration [J]. Fuel, 2011, 90 (1): 26-35.
- [62] JI Y G, LU Q, LIU Q, et al. Effect of solution salinity on settling of mineral tailings by polymer flocculants [J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2013, 430 (11): 29-38.
- [63] WANG S, ZHANG L, YAN B, et al. Molecular and Surface Interactions between Polymer Flocculant Chitosan-g-polyacrylamide and Kaolinite Particles: Impact of Salinity [J]. Journal of Physical Chemistry, 2015, 119 (13): 7327-7339.
- [64] WANG S, ALAGHA L, XU Z. Adsorption of organic-inorganic hybrid polymers on kaolin from aqueous solutions [J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2014, 453 (1): 13-20.
- [65] ROUX M L, CAMPBELL Q P. An investigation into an improved method of fine coal dewatering [J]. Minerals Engineering, 2003, 16 (10): 999-1003.
- [66] ROUX M L, CAMPBELL Q P, WATERMEYER M S, et al. The optimization of an improved method of fine coal dewatering [J]. Minerals Engineering, 2005, 18 (9): 931-934.

# 敬请关注



## 2018年全国选煤学术交流会

时间：2018年8月15日-18日      地点：宁夏·银川

